COMPARAÇÃO E VIABILIDADE DE DIFERENTES TIPOS DE RASTREADORES SOLARES PARA GERADORES FOTOVOLTAICOS

ARTIGO ORIGINAL

RODRIGUES, Luan Carlos¹, FIGUEIRA, Helem Borges²

RODRIGUES, Luan Carlos. FIGUEIRA, Helem Borges. **Comparação e viabilidade de diferentes tipos de rastreadores solares para geradores fotovoltaicos.**

Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano. 06, Ed. 12, Vol. 08, pp. 102-126. Dezembro de 2021. ISSN: 2448-0959, Link de acesso:

<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>,

DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares

RESUMO

Em meio às buscas por fontes de energias cada vez mais limpas e eficientes, a energia solar, em especial a fotovoltaica, está cada vez mais sendo utilizada por não poluir e apresentar uma forma rápida e barata de conversão em eletricidade, isso faz com que sua produção aumente gerando um ciclo de redução de preços. Uma forma de aumentar a eficiência desses painéis é a instalação de mecanismos, conhecidos como rastreadores solares ou *trackers*, que são capazes de fazer com que o sistema siga a movimentação do Sol, mantendo as placas fotovoltaicas o mais perpendicular possível aos raios solares. Foi verificada a viabilidade de investimento nos diversos tipos de estruturas existentes estudadas em diferentes artigos utilizando ferramentas como VPL, TIR e *Payback*. Utilizando as médias encontradas de eficiência, custos de investimentos, manutenção e consumo e comparando com sistemas que não utilizam rastreadores solares, foi verificado que o investimento nessas configurações

¹ MBA em engenharia e gestão de energias renováveis, Engenheiro eletricista.

² Orientador.

não se tornaria viável, porém, em determinados casos, poderiam ser encontrados na atualidade opções viáveis de rastreadores.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica, rastreador solar, viabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Já há alguns anos, o mundo vem buscando por fontes alternativas de energia, tanto como proteção da escassez de recursos ou opções de menor custo, mas o mais importante é a busca por recursos menos poluentes e sustentáveis. Existem muitas fontes de energias alternativas que podem ser usadas no lugar de combustíveis poluentes como os fósseis, por exemplo. Para a escolha de qual fonte de energia utilizar, deve-se levar em consideração fatores econômicos, ambientais e de segurança, assim, a energia solar tem grande potencial dentre as outras fontes de energia alternativa por ser sustentável e limpa, (KALOGIROU, 2014). A energia proveniente do Sol, é infinita para nossa escala de tempo e ela é responsável, mesmo que indiretamente, por quase todas as outras fontes de energia no planeta, seja permitindo a fotossíntese nas plantas, promovendo o ciclo das águas e ventos ou até a origem do petróleo que não seria possível sem a sua influência. De forma mais técnica, a energia solar hoje é dividida entre térmica e fotovoltaica. (PINHO; GALDINO, 2014).

É conhecida como fotovoltaica a energia que é transformada diretamente da luz em eletricidade através de painéis de silício e que hoje vem aumentando sua popularidade. Com a motivação de sempre conseguir formas mais eficientes, baratas e menos poluentes de energia, o objeto desse estudo são as estruturas de rastreadores solares (*trackers*) instaladas em painéis fotovoltaicos, que são mecanismos que fazem com que as placas sigam a movimentação do Sol, através de sensores ou algoritmos, mantendo os painéis o mais perpendicular possível em relação aos raios solares, aumentando a eficiência do sistema. Contudo, toda essa estrutura gera maiores custos de investimento, consumo e manutenção, tornando-se

necessário verificar a viabilidade dessas instalações, uma vez que existem diversos tipos estruturas, custos e formas de rastreamento.

Através do estudo de vários artigos a respeito, foram levantadas médias dos valores encontrados de investimento, consumo, eficiência e manutenção e comparados com sistemas que não utilizam rastreadores, a fim de analisar até que ponto se tornaria viável um investimento nessa tecnologia. Foram utilizadas ferramentas econômicas como VPL, TIR e *Payback*, que permitiram a comparação entre sistemas e estudos, fornecendo resultados mais precisos de viabilidade do investimento.

2. O CENÁRIO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Segundo o International Renewable Energy Agency, (DATA, 2019), a capacidade acumulada mundial de eletricidade renovável cresceu 7,4% no ano de 2019, saindo de 2,361 GW para 2,537 GW, podemos ver esse aumento constante na figura 1. A geração de eletricidade por energias renováveis já representava 26,3% (6.523 TWh) de toda eletricidade gerada no mundo em 2018, segundo a National Renewable Energy Laboratory, (RENEWABLE, 2018)

Figura 1. - Tendências em Energias Renováveis no mundo.

Fonte: DATA, 2019.

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

No Brasil, podemos notar a baixa parcela de outras fontes de energias renováveis frente à grande representatividade da fonte hídrica de geração, figura 2, porém com um aumento significativo na produção de energia solar fotovoltaica.

Figura 2. - Tendências em Energias Renováveis no Brasil.

Fonte: DATA, 2019.

Pôde-se notar um aumento do interesse da tecnologia no ano de 2013 na figura 3, parte por contribuição da Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, permitindo o consumidor a geração de sua própria energia através de energias renováveis e posteriormente com a Resolução Normativa nº 687/2015, determinado a micro e minigeração distribuída e passando o sistema de créditos de 36 para 60 meses do excedente gerado, entre outras facilidades que contribuíram para o incentivo da instalação dos sistemas fotovoltaicos. (ANEEL, 2018).

Figura 3. - Tendências em Energias Renováveis no mundo.

Fonte: DATA, 2019.

Outro fator que contribui para a utilização dessa tecnologia é a localização do país, o Brasil se encontra em uma geografia favorável para os índices de irradiação solar, como visto na figura 4, com valores de irradiação direta normal de 3,01 a 6,22 KWh/m², (GLOBAL, 2020).

Figura 4. – Irradiação Normal Direta.

Fonte: GLOBAL, 2020.

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

Cada vez mais com as melhorias da tecnologia e do aumento da produção, conseguem-se módulos fotovoltaicos mais eficientes e com menor custo, o que torna a tecnologia mais atrativa, outro fator importante são as medidas governamentais e incentivos através de financiamentos, tornando essa modalidade mais acessível. Nas figuras 5 e 6 vemos a evolução dos preços de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas e a evolução do fator de capacidade da tecnologia.

Figura 5. - Custos dos módulos fotovoltaicos 2010-2018.

Fonte: DATA, 2019.

Figura 6. – Fator de capacidade 2010 – 2018.

Fonte: DATA, 2019.

3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEU FUNCIONAMENTO

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Edmond Becquerel, em 1839, onde foi notada uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela absorção de luz, porém foi apenas em 1956 que se começou a produzir industrialmente por diversos fatores incentivadores, como inicialmente as telecomunicações, a corrida espacial, a crise do petróleo e hoje a redução de fontes poluentes de energia. (PINHO; GALDINO, 2014)

A conversão direta da luz em eletricidade é conhecida como energia fotovoltaica. O principal componente de geração dessa energia é conhecido como célula fotovoltaica, um componente composto de um material semicondutor, geralmente o silício. Dentre as diversas tecnologias e materiais utilizados para fabricação dessas células, os mais comuns são o silício monocristalino (m-Si) e o silício policristalino (p-Si), representando mais de 85% do mercado. (PINHO; GALDINO, 2014).

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

Segundo Kalogirou (2014), os módulos fotovoltaicos são dispositivos de estado sólido que convertem luz em eletricidade e por não terem partes móveis, sua manutenção é mínima e vida útil longa, não gera gases e por terem uma estrutura modular, podem ser conectados quantos painéis forem necessários para se atingir uma determinada potência de saída. Os módulos são compostos de duas ou mais finas camadas de material semicondutor, geralmente silício, cujos átomos possuem 4 elétrons na sua última órbita, quando se adiciona ao silício um material de 5 elétrons na última camada (fósforo por exemplo), em um processo conhecido como dopagem, sobra-se um elétron na combinação, fazendo o material ficar negativamente carregado, o chamamos de cristal *n*. O oposto ocorre ao dopar o silício com uma substância de 3 elétrons na última camada, o material fica com falta de um elétron na combinação, tornando-se positivamente carregado e consequentemente chamado de cristal *p*. Quando se adiciona um cristal *n* de um lado de um substrato de silício e *p* do outro, ocorre o que conhecemos como junção *pn*, nela ocorre a passagem de elétrons e lacunas de um lado para outro formando uma camada permanente de diferença de potencial. Se a energia dos fótons que atingir essa região for maior que a energia necessária para vencer esse *gap* de energia e se os cristais *p* e *n* forem conectados eletricamente, surgirá então uma corrente circulando nesse material, (ALCÂNTARA, 2013). Como a corrente gerada pelos módulos fotovoltaicos é contínua, é comum a utilização de inversores para deixá-la alternada e adequada para a utilização dos consumidores finais.

4. RASTREAMENTO SOLAR

Sabemos que a Terra faz dois movimentos principais conhecidos como translação, onde ela orbita em torno do Sol e de rotação, onde ela gira em seu próprio eixo. Segundo Kalogirou (2014) a Terra tem uma excentricidade baixa em sua órbita (0,01673), sendo praticamente circular, e um ângulo de inclinação de 23,45°, tendo um dia com aproximadamente 24h. Portanto a posição do Sol depende basicamente do horário, do dia do ano, da latitude e longitude do local. Veremos, portanto, em

Alves (2008) e Kalogirou (2014) algumas equações necessárias que determinam a posição do Sol no plano terrestre.

4.1 ÂNGULO HORÁRIO

O ângulo horário (ω), equação (1), é determinado de acordo com um dia de 24h, onde às 12h00 o Sol está posicionado a 0° e a cada hora seu ângulo muda 15° .

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (1)$$

Com t_s sendo a hora solar medida em horas de 0 a 24

4.2 EQUAÇÃO DO TEMPO

Durante o ano, ocorre uma diferença entre a hora solar média e a hora solar real que pode variar ± 17 minutos, como descreve a equação (2), *Equation Of Time*.

$$EOT = 0,258 \cos(x) - 7,416 \sin(x) - 3,648 \cos(2x) - 9,228 \sin(2x)$$

(2)

Onde x , por sua vez, é um ângulo expresso em graus e dependente do dia do ano (N), que varia de 1 a 365, como descreve a equação (3).

$$x = \frac{360(N - 1)}{365,242} \quad (3)$$

4.3 CONVERSÃO DO TEMPO

Através da equação (4), obtém-se a conversão da hora solar e do relógio.

$$t_s = LCT + \frac{EOT}{60} - LC - D$$

(4)

Onde LCT é a hora do relógio local (*Local Clock Time*), t_s a hora solar expressa em horas, EOT a equação do tempo, LC é a correção da longitude calculada na equação (5) também expressa em horas e D é igual a 1 ou 0 caso a região esteja em horário de verão ou não respectivamente.

$$LC = \frac{LL - LM}{15}$$

(5)

Com LL sendo a longitude do local e LM a longitude do meridiano do fuso horário local.

4.4 ÂNGULO DE DECLINAÇÃO

Segundo Kalogirou (2014), a Terra possui um ângulo entre o eixo de rotação e o eixo da eclíptica de 23,45°. O ângulo formado entre a linha imaginária que liga o centro da Terra com o Sol e o plano equatorial é conhecido como ângulo de declinação (δ), ilustrado pela figura 7. Conforme o planeta orbita o Sol durante o ano, essa declinação varia de -23,45° a 23,45° obedecendo a expressão (6), onde N é o dia do ano.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(\frac{360}{365} (284 + N) \right) \quad (6)$$

Figura 7. – Declinação terrestre.

Fonte: KALOGIROU, 2014.[/caption]

4.5 ÂNGULO DE ALTITUDE SOLAR

Um dos ângulos componentes da posição do Sol é o ângulo de altitude (α) que é formado entre os raios solares e o plano horizontal mostrados na figura 8 e expresso na equação (7).

Figura 8. – Ângulos das coordenadas solares.

Fonte: KALOGIROU, 2014.

$$\text{sen}(\alpha) = \text{sen}(L)\text{sen}(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

(7)

Onde L é a latitude local.

4.6 ÂNGULO DE AZIMUTE

Também na figura 8 vemos que o ângulo de azimute (z) é formado entre o Sul ou Norte (dependendo do hemisfério do local) com o Sol, sendo assim a componente horizontal dos raios solares no plano, onde é 0° às 12h. Esse ângulo é descrito pela expressão (8)

$$\text{sen}(z) = \frac{\cos(\delta) \text{sen}(\omega)}{\cos(\alpha)} \quad (8)$$

Utilizando as equações mencionadas, é possível criar algoritmos responsáveis por manter a estrutura do rastreador sempre na direção do Sol e ainda através de cálculos, determinar o ângulo de incidência dos raios solares.

5. SISTEMAS DE RASTREADORES SOLARES

Um sistema rastreador solar, também conhecido como *tracker*, é um dispositivo capaz de seguir a posição do sol durante o dia e ano. As formas mais comuns de rastreamento são por sensores que detectam a maior luminosidade, os chamados LDRs (*Light Dependent Resistor*), ou por algoritmos, formados pelas fórmulas antes apresentadas. Motores são responsáveis pela movimentação dessa estrutura, que se movimentam em certos intervalos de tempo. Existem várias formas possíveis de se desenvolver um rastreador solar, eles podem ser de dois eixos (*full tracking*), ou seja, ele é capaz de seguir o Sol totalmente, sempre tendo 100% de perpendicularidade com os raios solares, ou podem ser de um eixo, se diferenciando pela posição de seu eixo (ou sentido de movimentação do painel) como N-S horizontal, L-O horizontal, ou N-S polar. Vemos essas estruturas na figura 9.

Figura 9. – Diferentes estruturas de *trackers* de único eixo (identificadas pelo sentido de movimento).

Fonte: KALOGIROU, 2014.

6. ESTUDOS ECONÔMICOS

6.1 GANHO

Kalogirou (2014) comparou a energia recebida nesses diferentes tipos de rastreadores na latitude de 35° N, vemos na tabela 1 que o sistema de dois eixos (*full tracking*) tem 100% de aproveitamento da irradiação solar e que das estruturas

de um eixo a mais eficiente é a N-S polar (descrita como *E-W polar* pelo seu sentido de rastreamento), onde a inclinação do painel é fixada na latitude do local.

Tabela 1. – Comparação da energia recebida por várias formas de rastreamento.

Table 2.2 Comparison of Energy Received for Various Modes of Tracking						
Tracking Mode	Solar Energy Received (kWh/m ²)			Percentage to Full Tracking		
	E	SS	WS	E	SS	WS
Full tracking	8.43	10.60	5.70	100	100	100
E–W polar	8.43	9.73	5.23	100	91.7	91.7
N–S horizontal	7.51	10.36	4.47	89.1	97.7	60.9
E–W horizontal	6.22	7.85	4.91	73.8	74.0	86.2

E = equinoxes, SS = summer solstice, WS = winter solstice.

Fonte: KALOGIROU, 2014.

Outro experimento feito por Gutierrez et al (2020), compara as diferentes estruturas com um sistema fixo e apresenta o ganho em porcentagem. Vemos na tabela 2 esse resultado, onde tem-se um ganho de 33.8% do sistema de dois eixos em relação ao fixo e novamente a estrutura *north-south tilted single axis* (aqui identificada pela orientação do eixo) se torna mais eficiente, dentre as estruturas de um eixo, com um ganho de 27,7% sobre uma estrutura fixa. Um modelo diferente estudado pelo autor é o azimutal (*vertical tilted single axis*), no qual a base gira um painel inclinado à latitude acompanhando o ângulo azimutal do Sol.

Tabela 2. – Energia coletada por diferentes tipos de rastreadores.

Type of PV System	ANNUAL	
	Collected Irradiation (kWh/m ² /year)	Percentage Gain (%)
Fixed	2292	0.0
East–west horizontal single-axis	2462	7.5
Vertical tilted single-axis	2669	16.4
North–south horizontal single-axis	2840	23.9
North–south tilted single-axis	2927	27.7
Two-axes	3067	33.8

Fonte: Gutierrez et al, 2020.

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

Foram analisados diversos estudos de viabilidade com diferentes tipos de estruturas, na tabela 3 verificamos os ganhos conseguidos por esses experimentos, com uma média de ganho de 38,16% para sistemas de duplo eixo e 13,58% para estruturas de único eixo.

Tabela 3. – Eficiências dos rastreadores estudados (indicados pela orientação dos eixos).

Estudo	Estrutura	Eficiência		Cidade
Alcântara, 2013	Dois eixos	-	22,24%	Várias cidades
Sequeira, 2011	Dois eixos	-	28,00%	Murça
	Dois eixos	-	35,00%	Sobral
	Dois eixos	-	40,00%	Amarelejo
	Dois eixos	-	48,50%	Rio de Janeiro
Revoredo; Ribeiro; Leitão, 2019	Dois eixos	-	53,10%	Bauru
Alves, 2008	Dois eixos	-	39,20%	Belo Horizonte
Ferreira, 2017	Polar N-S	25,00%	-	
Trevelin, 2014	Dois eixos	-	39,20%	São Carlos
	Azimutal	25,00%	-	
Oliveira, 2008	Azimutal	11,00%	-	Porto Alegre
		7,00%	-	Aracaju
		8,00%	-	São Paulo
		11,00%	-	Macapá
		8,00%	-	Manaus
		9,00%	-	Recife
		-	-	-
Guarnieri, 2017	Horizontal N-S	18,00%	-	Várias cidades
Filho, 2019	Horizontal N-S	13,81%	-	Maringá

Fonte: AUTOR, 2020.

6.2 PREÇOS

Os preços apresentados na tabela 4 foram extraídos dos trabalhos anteriores da tabela 1, dos que disponibilizaram e eram relevantes. Os valores são apresentados

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

em R\$/W, os preços que originalmente são em outra moeda foram convertidos para Real na cotação em 06/07/2020 (Euro R\$ 6,02 e Dólar R\$ 5,31) apenas para comparação, sem considerar impostos e importação.

Tabela 4. – Preços dos rastreadores estudados.

Estudo/ empresa	Moeda original	Potência (KWp)	Fixo (R\$/W)	Um eixo (R\$/W)	Dois eixos (R\$/W)	Aumento
Sequeira, 2011	€	4,14	R\$ 21,81	-	R\$ 26,90	23%
Alves, 2008	R\$	0,05	R\$ 21,10	-	R\$ 28,63	36%
Alcântara, 2013	US\$	-	R\$ 8,32	-	R\$ 15,22	83%
Ferreira, 2017	R\$	2,34	R\$ 5,97	-	R\$ 12,08	102%
Ferreira, 2017	R\$	2,34	R\$ 5,97	R\$ 10,91	-	83%
Filho, 2019	R\$	8,76	R\$ 5,36	R\$ 6,37	-	19%
Guarnieri, 2017	R\$	90000	R\$ 2,63	R\$ 3,00	-	14%

Fonte: AUTOR, 2020.

Na coluna Aumento, são mostradas as porcentagens de aumento de preço entre a estrutura fixa e com rastreador. A média de aumento no preço para dois eixos foi de 61% e para um eixo foi de 38%. Para não causar divergências, foram calculadas as médias dos projetos de duplo eixo separadas dos de único eixo com suas respectivas estruturas fixas.

6.3 MANUTENÇÃO

O valor de manutenção anual das estruturas foi baseado em Sequeira (2011), onde para uma estrutura fixa gasta € 100,00 em 14 anos e € 150,00 nos 5 últimos e com a estrutura de rastreador € 150,00 em 14 anos e € 200,00 nos 5 últimos em uma vida útil de 20 anos, isso dá em médias anuais de € 107,50 e € 155,00 para uma potência instalada de 4,14KWp. Portanto, o preço por watt da manutenção é de 0,156 R\$/W para sistemas fixos e 0,225 R\$/W para trackers de duplo eixo. Obedecendo a proporção dos preços das estruturas, foi deduzida a manutenção dos sistemas de

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

único eixo, aumentando assim 38% do valor da manutenção do sistema fixo e obtendo o valor de 0,215 R\$/W.

6.4 CONSUMO DO TRACKER

Na tabela 5, vemos o consumo do sistema de tracker em KWh/dia que foram obtidos dos estudos. Foram incluídas duas marcas – Huayue (SHANDONG, 2020) e Sat Control (SAT, 2020) – que foram pesquisadas na internet.

Tabela 5. – Consumo dos rastreadores.

Marca	Fonte	Tipo	Potência (KWp)	Geração (KWh/dia)	Consumo do tracker (KWh/dia)	Porcentagem do consumo
Satcontrol	Satcontrol	2 eixos	4,5	18,83	0,01752	0,0931%
Huayue	Huayue	2 eixos	32	133,89	1,50000	1,1203%
Mecasolar	Alcântara, 2013	2 eixos	7	29,29	0,15000	0,5122%
Feina SF09	Ferreira, (2017)	2 eixos	2,34	11,44	0,00300	0,0262%
Huayue	Huayue	Horiz.	72	301,25	1,00000	0,3320%
Romagnole	Filho, (2019)	Horiz.	1000	4184	5,00000	0,1195%
Etatrack 1000-30 Lorentz	Ferreira, (2017)	polar	2,34	10,27	0,00274	0,0267%

Fonte: AUTOR, 2020.

A geração de energia do sistema fotovoltaico, salvo os valores fornecidos pelos experimentos, foram calculadas de acordo com a expressão utilizada por Soares, et al (2020), onde pode-se determinar a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos através da potência de pico instalada pela expressão (9). Foi utilizado pelo autor um rendimento de 80% sem considerar perdas de eficiência das células por temperatura. A irradiação solar média mensal adotada foi de 5,23 KW/m².dia, da cidade de Bauru (coordenadas 22,301° S, 49,049° O), para um ângulo igual a latitude, de acordo com o site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), (POTENCIAL, 2020).

$$E_G = P_P R I$$

(9)

Onde E_G é a energia gerada, P_P é a potência de pico instalada (KWp), R é o rendimento médio e I a irradiação solar média mensal do local em questão.(9)

A porcentagem do consumo é calculada com base na potência de geração do sistema. Com esses valores foi obtida uma média de 0,4379% para dois eixos e 0,1594% para sistemas de um eixo.

7. ESTUDO DE VIABILIDADE E COMPARAÇÃO

Para verificar a viabilidade e comparar os investimentos em questão, foram utilizadas algumas técnicas que auxiliam na tomada de decisão, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback*.

7.1 VPL

O VPL, segundo Silva (2018), é utilizado para trazer os valores futuros dos retornos do investimento para a data zero baseado em uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA), ele é calculado através da expressão (10).

$$VPL = \sum_{j=1}^t \frac{c_j}{(1+k)^j} - c_i \quad (10)$$

Onde c_j é o capital de retorno, c_i o capital de investimento, k é a TMA e j é o período, em um somatório em um tempo t .

Com o $VPL = 0$, os retornos do investimento são iguais à TMA e se são positivos, a taxa de retorno é maior que a TMA.

7.2 TIR

A Taxa Interna de Retorno (TIR), demonstrada pela expressão (11), é a taxa com que um investimento inicial retorna, trazendo os valores futuros para o presente. Portanto, é atrativo um investimento que possui um TIR maior que a TMA.

$$\sum_{j=1}^n \frac{c_j}{(1+TIR)^j} - c_i = 0 \quad (11)$$

Onde as variáveis são as mesmas da expressão (10). Igualando-se a equação com c_i , é possível determinar a taxa de retorno desse investimento.

7.3 PAYBACK

O *payback*, calculado com a expressão (12), é utilizado para saber o tempo que um investimento vai ser pago através de seu retorno.

$$\text{Payback} = \frac{\text{investimento inicial}}{\text{retorno por período}} \quad (12)$$

As expressões apresentadas auxiliaram na comparação entre os investimentos em rastreadores de duplo ou único eixo, baseando-se em qual proporciona um VPL e TIR maiores e *payback* menor, justificando a escolha.

8. CÁLCULO DE VIABILIDADE

Para a TMA, foi adotada a taxa Selic, que no período estava em 2,25% ao ano, a base de tempo foi baseada na vida útil média dos sistemas fotovoltaicos, 25 anos de acordo com os fabricantes Sat control e Huayue New Energy. No primeiro cenário foram utilizadas as médias encontradas anteriormente. Os preços médios foram obtidos calculando os projetos fixos da tabela 4 e multiplicado pela média de aumento 61% e 38%, como mostra a tabela 6.

Tabela 6. – Média de preços conforme estrutura.

Estudo/ empresa	Fixo (R\$/W)	Um eixo (R\$/W)	Dois eixos (R\$/W)
Sequeira, 2011	R\$ 21,81	R\$ 30,10	R\$ 35,12
Alves, 2008	R\$ 21,10	R\$ 29,12	R\$ 33,97
Alcântara, 2013	R\$ 8,32	R\$ 11,48	R\$ 13,40
Ferreira, 2017	R\$ 5,97	R\$ 8,24	R\$ 9,62
Ferreira, 2017	R\$ 5,97	R\$ 8,24	R\$ 9,62

Filho, 2019	R\$ 5,36	R\$ 7,40	R\$ 8,63
Guarnieri, 2017	R\$ 2,63	R\$ 3,63	R\$ 4,24

Fonte: AUTOR, 2020.

Com isso, as médias obtidas foram 10,17 R\$/W para os sistemas fixos, 14,03 R\$/W para sistemas de único eixo e 16,37 R\$/W para sistemas de duplo eixo. A tabela 7 mostra os valores utilizado no cenário 1.

Tabela 7. – Cenário 1: Médias utilizadas para o cálculo de viabilidade.

	Fixo	Um eixo	Dois eixos
Preço	10,17 R\$/W	14,03 R\$/W	16,37 R\$/W
Eficiência	-	13,58%	38,16%
Manutenção	0,156 R\$/W	0,215 R\$/W	0,225 R\$/W
Consumo	-	0,1594%	0,4379%

Fonte: AUTOR, 2020.

Com essa configuração, uma instalação de 10KWp fixa custaria R\$ 101.700,00 e necessitaria de uma manutenção de R\$ 1.560,00 ao ano, retornando R\$ 9.457,38 ao ano de acordo com a equação (9) menos os gastos, que daria R\$ 8.028,73. A tarifa de energia elétrica utilizada foi a cobrada pela CPFL na data e local desse projeto de 0,62788 R\$/KWh, valor este para uma categoria residencial. Somente a estrutura de um tracker de dois eixos (desconsiderando a parte fixa), custaria R\$ 62.000,00, com manutenção de R\$ 690,00 e consumo de R\$ 41,99, retornando R\$ 3.608,94 menos os gastos, resultando em R\$ 2.927,07. Portanto o total gerado, considerando as parcelas da parte fixa e da estrutura, calculado pela equação (13) foi de R\$10.955,80.

$$\text{Energia gerada} = \text{Geração total} - \text{Manutenção total} - \text{Consumo}$$

(13)

Com esses valores foi obtido para o sistema fixo um VPL de R\$ 50.543,89, TIR de 6,10% e *payback* de 12,67 anos, porém para o tracker o VPL foi de R\$ -6.495,76, TIR 1,32% e *payback* de 21,18 anos.

Para o tracker de um eixo, o custo de instalação somente da estrutura seria R\$ 38.600,00 (o custo somente do tracker foi obtido subtraindo o custo da instalação fixa do total da instalação com o rastreador), a manutenção R\$ 590,00 e consumo R\$ 15,28, retornando um valor de R\$ 1.284,31 menos os gastos, gerando R\$ 696,87, somando esses valores à parte fixa, de acordo com a equação 13, energia total gerada seria de R\$ 8.725,60. Nessa situação o VPL somente do rastreador seria de R\$ -25.385,77, TIR -5,37% e *payback* de 55,39 anos.

Os dois tipos de estruturas se mostraram inviáveis na configuração adotada, uma vez que os valores de VPL foram negativos e o *payback* do investimento aumentado por conta do rastreador.

Na tabela 8 foram calculados o VPL, TIR e *payback* totais dos estudos mencionados na tabela 5 e mantendo as eficiências, os custos de manutenção e consumo, alterando somente os preços.

Tabela 8. – VPL, TIR e *Payback* dos estudos.

Estudo/empresa	Fixo			Tracker		
	VPL	TIR	Payback	VPL	TIR	Payback
Sequeira (2011)	-R\$ 65.856,11	-0,63%	27,16	R\$ 4.604,24	3,01%	17,39
Alves (2008)	-R\$ 58.756,11	-0,38%	26,28	-R\$ 19.795,76	-0,22%	25,73
Alcântara	R\$	8,35%	10,36	-R\$	0,46%	23,57

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

(2013)	69.043,89			13.495,76		
Ferreira (2017)	R\$ 92.543,89	12,78%	7,44	-R\$ 5.595,76	1,44%	20,87
Ferreira (2017)	R\$ 92.543,89	12,78%	7,44	-R\$ 36.185,77	-6,81%	70,89
Filho (2019)	R\$ 98.643,89	14,47%	6,68	R\$ 3.114,23	4,72%	14,49
Guarnieri (2017)	R\$ 125.943,89	30,49%	3,28	R\$ 9.514,23	18,57%	5,31

Fonte: AUTOR, 2020

Vemos que para Sequeira, 2011 e Alves, 2008, o projeto é inviabilizado já na parte fixa, pois contém VPLs e TIRs negativos, em Alcântara (2013) e Ferreira (2017), o VPL dos trackers também são negativos, apesar da estrutura fixa serem viáveis. Em Filho (2019) e Guarnieri (2017), apesar dos investimentos serem viáveis em termos de VPL e TIR, tornam-se inviáveis pois aumentam o *payback* do investimento.

Um cenário positivo foi criado como exemplo utilizando os custos de instalação de Guarnieri (2017), que utiliza um rastreador de um eixo e o maior ganho para essa estrutura, de 25%, encontrado em Ferreira (2017) e Trevelin (2014), para uma instalação de 10KWp, os valores são mostrados na tabela 9. Foram mantidos os valores de manutenção e consumo.

Tabela 9. – Cenário positivo.

	Fixa	Tracker	Total
Preço	R\$ 2,63	R\$ 0,37	R\$ 5,63
Custo	R\$ 26.300,00	R\$ 3.700,00	R\$ 30.000,00
Eficiência	-	25%	-
Retorno	R\$ 8.028,73	R\$ 1.791,90	R\$ 9.820,63

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

VPL	R\$ 125.943,89	R\$ 30.278,67	R\$ 156.222,56
TIR	30,49%	48,43%	32,71%
Payback	3,28	2,06	3,05

Fonte: AUTOR, 2020.

Vemos que, no caso exemplificado, o investimento do tracker se torna viável, pois possui VPLs positivos, TIRs maiores que a TMA e o *payback* do tracker é menor que da estrutura fixa, o que impacta no resultado total e diminui o tempo de retorno do investimento.

9. CONCLUSÃO

Foi verificado que os projetos dos estudos se mostraram inviáveis com as suas configurações, bem como a média do total gerada por eles. Considerando TIR e VPL viáveis, um ponto crítico de escolha mostrado na equação (14) é quando o *payback* do tracker se iguala ao do sistema fixo, nesse ponto não se ganha nem perde com a utilização do rastreador, portanto, o projeto torna-se interessante a partir de quando o *payback* do tracker começa a ser menor que da estrutura fixa, pois assim, se consegue diminuir o tempo de retorno do projeto total (estrutura fixa mais o tracker).

$$\frac{\text{Investimento } f}{\text{Gerado } f - \text{Manutenção } f} > \frac{\text{Investimento } t}{\text{Gerado } t - \text{Manutenção } t - \text{Consumo } t}$$

(14)

Onde os índices *f* e *t* significam fixo e tracker.

Portanto, as variáveis que influenciam na diminuição do *payback* de um rastreador são o custo de investimento, a eficiência do tracker, o custo com manutenção, e o consumo.

O cenário positivo exemplificado na tabela 9, mostra que é possível atualmente conseguir uma viabilidade na instalação de um rastreador solar em uma estrutura fotovoltaica, buscando boas eficiências e preços, pois são os fatores que mais influenciam na viabilidade. Outro fator importante que contribui para a diminuição dos custos é o tamanho do projeto, foi visto na tabela 2 uma tendência na queda dos preços conforme o aumento da potência instalada, isso faz com que diminua não somente os custos de investimento como também torna a manutenção mais barata e um consumo por KWp menor.

Outro ponto importante é a tendência vista na tabela 8, onde os rastreadores de único eixo são os mais viáveis quando comparados com *trackers* de dois eixos, isso mostra que em uma eventual escolha de estrutura, o primeiro, na maioria dos casos, mostra-se mais vantajoso apesar de apresentar uma eficiência menor.

Com o passar do tempo os painéis geradores ficam cada vez mais baratos, visto que é possível encontrar kits de geração mais baratos que a média encontrada nesse artigo, assim o interesse por *trackers* tende a ser menor por ser mais difícil de abaixar o custo das estruturas, mas vivemos em um cenário em que ainda se encontra viabilidade nesse tipo de investimento, portanto é válido uma análise em cada caso, uma vez que os preços e eficiências mudam rapidamente com o passar do tempo.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, É. C. de. **Ferramenta para estimar o desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes estruturas de inclinação e tecnologias – Uma análise comparativa do ganho proveniente da utilização de seguidor de Sol e concentrador solar.** 117 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. 153 p. Tese (Doutorado em Agronomia). – Faculdade de Ciências Agromômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

DATA & Statistics. **International Renewable Energy Agency (IRENA)**, 2019. Disponível em: < <https://www.irena.org/Statistics>>. Acesso em: 26 jun. 2020.

FERREIRA, T. E. **Análises de custos e de viabilidade econômica para sistemas fotovoltaicos: painéis fixos e painéis móveis**. 37 p. Monografia (Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos). – Universidade Federal de Santa Maria, Novo Hamburgo, 2017.

FILHO, C. C. U. **Análise de viabilidade do sistema seguidor solar de um eixo horizontal para geradores fotovoltaicos**. 11 p. Artigo (Graduação em Engenharia Elétrica). – Unicesumar, Maringá, 2019.

GERAÇÃO Distribuída. **ANEEL**, 2015. Disponível em: < www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 25 jun. 2020.

GLOBAL Solar Atlas. **Global Solar Atlas**, 2020. Disponível em: < globalsolaratlas.info>. Acesso em: 26 jun. 2020.

GUARNIERI, M. V. **Usinas solares fotovoltaicas com seguimento em um eixo no Brasil: aspectos da construção, custos e expectativa de desempenho**. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

GUTIERREZ, Sebastian. et al. **Development and testing of a single-axis photovoltaic sun tracker through the internet of things**. *Energies*, Basel, Suíça, v. 13, n. 2547, 2020. Disponível em <mdpi.com>. Acesso em: 08 jun. 2020.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar Energy Engineering. Processes and Systems**. 2. ed. Kidlington: Academic Press, 2014.

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

OLIVEIRA, M. M. **Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB, 2014.

POTENCIAL Solar - CRESEB. Disponível em:
<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 11 jun. 2020.

RENEWABLE Energy Data Book. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, 2018. Disponível em: <nrel.gov>. Acesso em: 26 jun. 2020.

REVOREDO T. C; RIBEIRO M. V. S.; LEITÃO P. L. M. **Especificação e prototipagem de um sistema de microgeração fotovoltaica com rastreamento solar**. Revista Brasileira de Energia Solar, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, 2019. Disponível em <rbens.emnuvens.com.br>. Acesso em: 09 maio 2020.

SAT Control. Disponível em: <http://www.solar-motors.com/?gclid=EAlaIqObChMIlsyTu4TK6QIViJWzCh3XqwHvEAAYASAAEgIDNPD_BwE>. Acesso em: 21 maio 2020.

SEQUEIRA, A. R. P. **Microgeração fotovoltaica. Análise da viabilidade técnico-econômica**. 88 p. Relatório de estágio (Mestrado em Engenharia do Ambiente). – Universidade Católica Portuguesa, Porto, Portugal, 2011.

SHANDONG Huayue New Energy Co., Ltd. Disponível em:
<<https://uniquesolar.en.alibaba.com/?spm=a2700.details.cordpanyb.4.6740dfWvdfWvDj>>. Acesso em: 22 maio 2020.

SILVA, J. S. da. **Equações algébricas e progressões geométricas utilizadas nos métodos de decisão de investimentos baseados no VLP e TIR**. 60 p. Dissertação

RC: 103710

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>

(Mestrado em Matemática). – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SOARES P. M. et al. **Avaliação econômica e técnica de um sistema conectado à rede: estudo de caso de condomínio na cidade de Brasília, Brasil.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 6, 2020. Disponível em <<https://www.brazilianjournals.com/>>. Acesso em: 11 jun. 2020.

TREVELIN, F. C. **Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos.** 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Enviado: Janeiro, 2021.

Aprovado: Dezembro, 2021.